

## بهینه سازی روش ALPRIFT با استفاده از ماشین بردار پشتیبان (SVM) برای ارزیابی

### آسیب پذیری فرونشست دشت جنوب غربی تهران

علی منافی آذر<sup>۱</sup>، ماشاالله خامه چیان<sup>۲\*</sup>، عطاالله ندیری<sup>۳</sup>، محمد شریفی کیا<sup>۴</sup>

پذیرش مقاله: ۹۷/۱۲/۱۱

دریافت مقاله: ۹۷/۰۶/۱۸

#### چکیده

با توجه به افزایش جمعیت و توسعه فعالیت‌های کشاورزی در دشت جنوب غربی تهران که سبب افزایش برداشت آب‌های زیرزمینی شده، ارزیابی پتانسیل آسیب‌پذیری مناطق دارای فرونشست اهمیت زیادی دارد. در این پژوهش آسیب‌پذیری دشت جنوب غربی تهران در برابر فرونشست به کمک روش ALPRIFT در محیط ArcGIS بررسی شده و بهینه سازی روش ALPRIFT با استفاده از مدل ماشین بردار پشتیبان (SVM) صورت گرفته است. برای اجرای روش ALPRIFT از پارامترهای موثر در ارزیابی آسیب‌پذیری فرونشست استفاده شده که به صورت هفت لایه جداگانه رتبه دهی و وزن دهی شده و از تلفیق این هفت لایه، شاخص ALPRIFT محاسبه شد که بر اساس نتایج بدست آمده ۱۷۳-۷۷ برآورد شد. به منظور بهینه‌سازی روش ALPRIFT از مدل SVM استفاده و به این منظور داده‌های ورودی (پارامترهای ALPRIFT) و خروجی (شاخص آسیب‌پذیری) و مقدار فرونشست مربوط به آن به دو دسته آموزش و آزمایش تقسیم شد و پس از آموزش مدل، با استفاده از مقدار فرونشست نتایج مدل در مرحله آزمایش ارزیابی شد. نتایج نشان داد مدل ماشین بردار پشتیبان، قابلیت بهبود نتایج روش ALPRIFT اولیه را دارد. برای صحت سنجی نتایج از نقشه ماهواره‌ای InSAR و ضریب همبستگی ( $R^2$ ) آن با شاخص آسیب‌پذیری و شاخص همبستگی (CI) پیرومترهای موجود در دشت استفاده شد. مدل ماشین بردار پشتیبان با داشتن ضریب تعیین ( $R^2$ ) و شاخص همبستگی (CI) بیشتر نسبت به روش ALPRIFT، روش بهتری برای ارزیابی آسیب‌پذیری فرونشست دشت جنوب غربی تهران است.

کلید واژه‌ها: آسیب‌پذیری، ALPRIFT، ماشین بردار پشتیبان، بهینه سازی، نقشه ماهواره‌ای InSAR

۱. دانشجوی ارشد زمین شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، [alimanafiazar@yahoo.com](mailto:alimanafiazar@yahoo.com)

۲. استاد زمین شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده علوم پایه، [khamechm@modares.ac.ir](mailto:khamechm@modares.ac.ir)

۳. دانشیار آبهای زیرزمینی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

۴. دانشیار سنجش از دور، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده علوم انسانی

\*مستول مکاتبات

## ۱. مقدمه

فرونشست زمین، عبارت است از فروریزش یا پایین رفتن سطح زمین که به صورت تغییرات ارتفاعی قائم سطح زمین قابل شناسایی می‌باشد و با جابجایی‌های اندک افقی نیز همراه است. فرونشست زمین در اثر فرآیندهای طبیعی و یا فعالیت‌های بشرزاد ایجاد می‌شود (Waltham, 1989).

عوامل مختلفی سبب رخداد فرونشست زمین می‌شوند که می‌توان به برداشت بیش از حد آب‌های زیرزمینی، نوع بافت خاک، ساختار زمین‌شناسی اشاره کرد. در آبخوان‌هایی که ضخامت زیادی از رسوبات رسی در میان رسوبات ماسه و گراول به صورت مخلوط وجود داشته باشد، فرونشست زمین می‌تواند همراه با برداشت شدید آب زیرزمینی ایجاد گردد (Younger, 2007).

فرونشست به‌عنوان یک مخاطره زیست‌محیطی، به دلیل عملکرد آرام و زمان‌بر، تا زمانیکه تحت تاثیر نیروهای انسان‌زاد ایجاد نشده باشد، چندان قابل تشخیص نیست و اغلب به صورت تغییرات سطحی یا ترک در تاسیسات و ساختمان‌ها دیده می‌شود. همراه شدن روند طبیعی فرونشست زمین، با عوامل غیرطبیعی محرک آن، باعث تشدید فعالیت فرونشست شده، به طوری که علاوه بر خسارات مورفولوژیکی سطحی، خسارات مالی و جانی را نیز برای انسان به‌همراه خواهد داشت. تنش‌های کششی و فشاری در ساختمان خاک در اثر خروج آب زیرزمینی و بدنبال آن فشرده‌گی خاک، ایجاد سیلاب در مناطق پایین‌دست نواحی ساحلی به علت فشرده شدن خاک زیرین، شکسته شدن تجهیزات چاه‌های آب در اثر فشرده شدن رسوبات، از جمله عوارض ناشی از رخداد فرونشست می‌باشند (Poland, 1984). علاوه بر این، محل وقوع فرونشست نیز زمانیکه در محل تحت تاثیر سایر مخاطرات زیست‌محیطی باشد، می‌تواند اثرات فاجعه‌باری بدنبال داشته باشد. بعنوان مثال، رخداد فرونشست در محل دارای پتانسیل وقوع زمین‌لرزه می‌تواند سبب رخداد زمین‌لرزه

فاجعه‌باری شود که تا قبل از آن چندان مخرب نبوده است زیرا فرونشست زمین باعث ایجاد ترک‌ها در سطح زمین و ساختمان‌ها شده و شرایط را برای رخداد اثرات فاجعه‌بار مستعد می‌کند (شریفی کیا، ۱۳۹۱).

نظریه آسیب‌پذیری آبخوان بر این اساس است که قسمتی از آبخوان از دیگر مناطق پایدارتر است (Vrba and Zaporozec, 1994). روش‌های متعددی برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان وجود دارد. مهمترین و رایج‌ترین این روش‌ها عبارتند از: IRISH, DRASTIC و AVI (Van, 1999). یکی از روش‌های ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان، روش ALPRIFT می‌باشد. ALPRIFT یک چارچوبی برای ارائه ارزیابی پتانسیل فرونشست آبخوان است که از ۷ لایه اطلاعات تشکیل شده است و عبارتند از: جنس آبخوان (A)، کاربری زمین (L)، میزان پمپاژ آب زیرزمینی (P)، تغذیه آبخوان (R)، ضخامت زون اشباع (I)، فاصله از گسل‌ها (F) و افت سطح آب زیرزمینی (T) که این لایه‌ها به اختصار ALPRIFT خوانده می‌شوند. مبنای روش ALPRIFT به صورت نرخ‌دهی و وزن دهی می‌باشد تا مقادیر کلی وزن‌ها بر اساس حساسیت لایه‌ها و شرایط محلی به دست بیاید (Nadiri et al., 2018).

در سال‌های اخیر، روش‌های هوش مصنوعی مانند شبکه عصبی مصنوعی، منطق فازی، ماشین بردار پشتیبان و برنامه ریزی بیان ژن به طور موثر برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان و فرونشست مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Dixon, 2005 a,b). مدل‌های هوش مصنوعی مانند ماشین بردار پشتیبان تخمین‌گرهای ریاضی قوی برای یافتن رابطه غیر خطی بین داده‌های ورودی و خروجی بدون نیاز به اطلاعات جامع هستند. این مدل‌ها برای بسیاری از مسائل هیدرولوژیکی و ژئوتکنیکی مانند پیش‌بینی سیلاب رودخانه‌ها، پیش‌بینی و ارزیابی پتانسیل فرونشست، مدل‌های تبخیر، پیش‌بینی بارش و مدل‌های پیش‌بینی نواسانات سطح آب زیرزمینی مورد استفاده

و  $50^{\circ} 30'$  تا  $51^{\circ} 42'$  طول شرقی قرار دارد (شکل ۱). مساحت دشت تهران افزون بر  $2250$  کیلومتر مربع می باشد که حدود  $350$  کیلومتر مربع آن کوهپایه و بیرون زدگی های داخل دشت و  $1900$  کیلومتر مربع آن، بخش هموار دشت است. متوسط ارتفاع دشت  $1100$  متر و بیشینه ارتفاع در قله توچال به  $3933$  متر می رسد، حداکثر و حداقل ارتفاع دشت مورد مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده است. میانگین بارندگی سالانه در جنوب دشت تهران کمتر از  $200$  میلی متر و در شمال این دشت به حدود  $500$  میلی متر می رسد. منحنی های هم باران منطقه نشان می دهد که باران در دشت تهران از جنوب به شمال افزایش می یابد و بارش متوسط دشت تهران در حدود  $250$  میلی متر برآورد می شود. به طور کلی  $10$  رودخانه به محدوده دشت تهران وارد می شود که مهمترین رودخانه های تغذیه کننده دشت تهران رودخانه کرج و کن می باشند ( سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور،  $1384$ ).

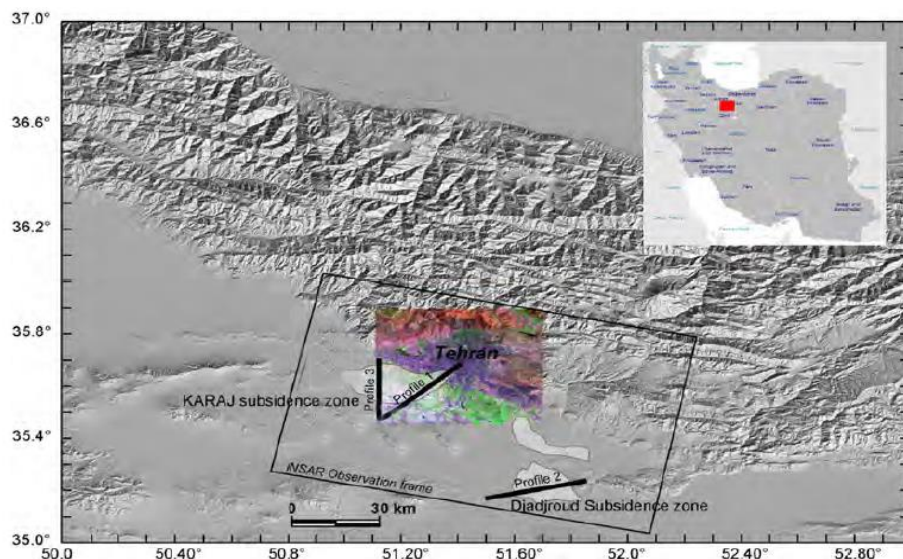
قرار می گیرند ( Valverde Ramírez et al., 2005; Kumar et al., 2005).

فرونشست زمین در دشت تهران از سال  $1990$  میلادی به بعد مشاهده شده است (Amighpey et al., 2006). مطالعات اخیر در مورد فرونشست دشت جنوب غربی تهران با مدل PMWIN نشان می دهد که سالانه بالغ بر  $15$  سانتی متر فرونشست و میزان فرونشست برای سال  $2018$  نیز حدود  $17$  سانتی متر بر سال پیش بینی شده است ( Mahmoudpour et al., 2016).

در این پژوهش، پتانسیل آسیب پذیری فرونشست دشت جنوب غربی تهران با مدل ALPRIFT که شامل  $7$  لایه موثر بر فرونشست می باشد بررسی شد و با اینکه نتایج این مدل قابل قبول بود اما با استفاده از ماشین بردار پشتیبان به منظور افزایش صحت مدل بهینه سازی شد.

## ۲. منطقه مورد مطالعه

دشت تهران دارای شیبی از شمال به سمت جنوب است که در موقعیت جغرافیایی  $35^{\circ} 12'$  تا  $35^{\circ} 59'$  عرض شمالی



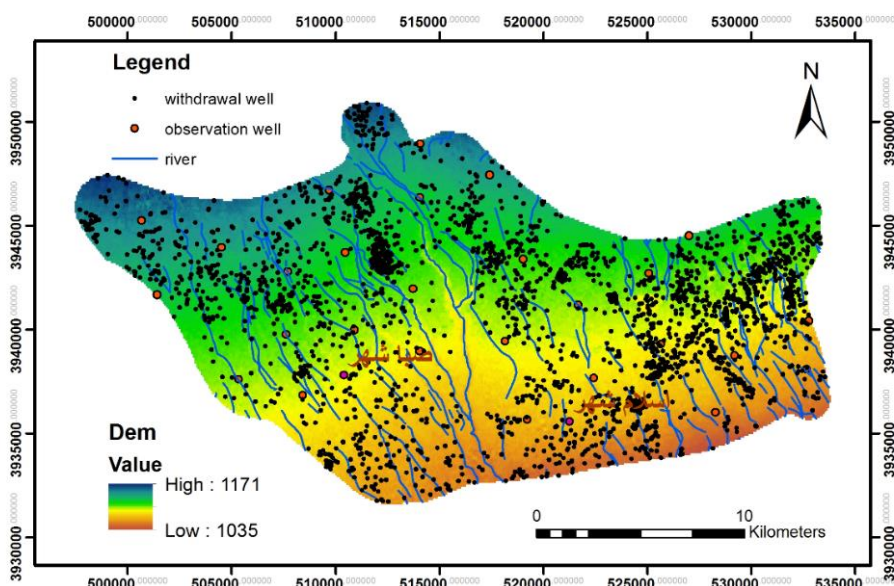
شکل ۱. منطقه مورد مطالعاتی. (قسمت رنگی شد داخل کادر نقشه SAR شهرستان تهران و دشت جنوب غربی تهران را نشان می

دهد)

رس‌های سیل‌تی و سیلت‌های رسی تشکیل شده‌اند. وجود لایه های ریزدانه به عنوان عامل مهم و تاثیرگذار بر فرونشست این منطقه به حساب می‌آیند (محمود پور، ۱۳۹۴).

ضخامت آبرفت آبخوان دشت تهران در بخش‌های شمالی به بیش از ۴۰۰ متر و در بخش‌های شمال‌غربی به حدود ۳۰۰ متر می‌رسد. در بخش‌هایی از شمال، شرق، جنوب‌غرب دشت، به دلیل بالا آمدگی سنگ کف، ضخامت آبرفت به کمتر از ۲۵ متر می‌رسد (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۴).

جهت جریان آب زیرزمینی هم سو با شیب عمومی دشت از شمال به سمت جنوب و در نهایت به سمت جنوب خاوری است. در برخی از پهنه‌ها به دلیل تغییرات میزان نفوذپذیری و عمق سنگ کف، موقعیت‌های محلی و ویژگی‌های هندسی گذرگاه‌های آب زیرزمینی و نیز تغذیه و زهکشی‌های جانبی آبخوان، در جهت عمومی آب زیرزمینی انحراف‌هایی بوجود آمده است (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۴). واحدهای آبخوان موجود در این دشت به طور عمده از ماسه‌های ریزدانه تا ماسه‌های سیل‌تی که گاهی با اندکی شن همراه است و واحدهای رسی ریزدانه با نفوذپذیری کم از



شکل ۲. نقشه ارتفاعی (دم) منطقه مورد مطالعه

شده، بر روی هم تلفیق و هم‌پوشانی گردیده و نقشه آسیب پذیری فرونشست به دست آمده و با استفاده از مدل ماشین بردار پشتیبان (SVM) بهینه سازی می‌شود. در نهایت ضریب همبستگی مدل‌های به دست آمده با نقشه ماهواره-ای InSAR به منظور صحت سنجی اطلاعات، تطبیق داده می‌شود.

### ۳. روش پژوهش

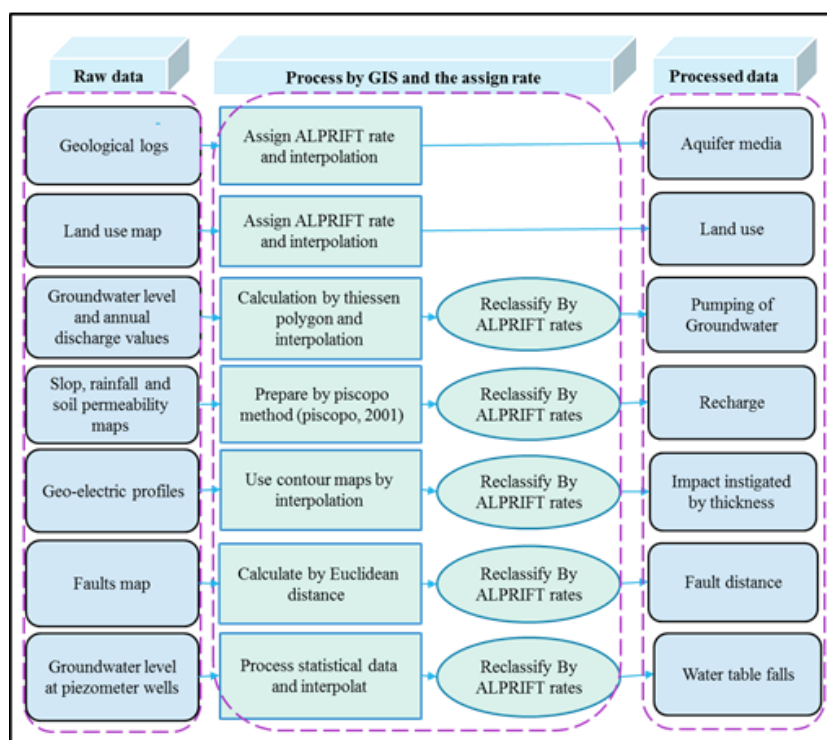
روش ارائه شده برای بررسی شاخص آسیب‌پذیری فرونشست دشت مورد مطالعه به صورت مدل سیستم امتیازدهی نقطه‌ای (PCSM) است. بطوریکه با استفاده از مدل ALPRIFT که یک روش برای ارزیابی شاخص آسیب‌پذیری و شامل ۷ لایه موثر بر فرونشست می‌باشد، نقشه لایه های موثر بر فرونشست را در بازه زمانی یک سال (۹۴-۹۵)، با استفاده رتبه‌های مشخص شده، در نرم افزار ArcGIS کلاس بندی کرده و با توجه به وزن داده

## ۳-۱. مدل ALPRIFT

$$\text{Subsidence vulnerability index (SVI)} = A_r A_w + L_r L_w + P_r P_w + R_r R_w + I_r I_w + F_r F_w + T_r T_w \quad (1)$$

در رابطه بالا SVI شاخص آسیب پذیری فرونشست،  $A, L, P, R, I, F, T$  هفت عامل موثر بر فرونشست،  $r$  رتبه های تعلق گرفته به هر دسته و  $w$  وزن هر عامل را نشان می دهد در روش ALPRIFT باید نقشه های رقومی هر یک از لایه ها در نرم افزار ArcGIS تهیه شود. پس از تهیه نقشه های پایه و استفاده از قابلیت نرم افزار در خصوص انجام عملیات رستری با بر هم نهی لایه ها، نقشه آسیب پذیری فرونشست منطقه مورد مطالعه آماده شود. روش کلی انجام این عملیات در شکل ۳ نشان داده شده است. شایان یادآوری است که در این پژوهش برای بهینه بندی نقشه ها از روش IDW و کریجینگ در نرم افزار ArcGIS استفاده شد

مدل ALPRIFT توسط ندیری و همکاران (Nadiri et al., 2018) به منظور برآورد پتانسیل آسیب پذیری فرونشست ارائه شده است. این مدل هفت عامل یا پارامتر قابل اندازه گیری را در نظر می گیرد که برای برآورد پتانسیل فرونشست ضروری اند. روش ALPRIFT دربرگیرنده ۷ پارامتر که شامل، جنس لایه های زیرین (A)، کاربری زمین (L)، پمپاژ آب زیرزمینی (P)، تغذیه (R)، ضخامت آبخوان (I)، فاصله از گسل (F) و میزان افت سطح آب زیرزمینی (T) می باشد، که هر یک از این پارامترها با توجه به پتانسیل فرونشست آن، نرخ از یک تا ۱۰ اختصاص داده می شود. یک به معنای کمترین و ۱۰ بیشترین خطر فرونشست در نظر گرفته می شود (جدول ۱). و در نهایت از مجموع حاصل ضرب وزن هر لایه در رتبه های آن لایه (رابطه ۱)، شاخص آسیب پذیری فرونشست در هر نقطه از محدوده حاصل می شود.



شکل ۳. چارچوب تهیه لایه ورودی برای ارزیابی شاخص آسیب پذیری تحت مدل ALPRIFT

در این تحقیق، عملکرد مدل‌های برنامه‌ریزی بیان ژن در پیش-بینی شاخص آسیب‌پذیری فرونشست از پارامترهای آماری جذر میانگین مربعات خطا ( $RMSE$ ) و ضریب تعیین ( $R^2$ ) مورد بررسی قرار گرفت تا دقت آنها نسبت به یکدیگر در مقایسه با داده‌های حاصل از مدل  $ALPRIFT$  مورد ارزیابی قرار گیرد.

### ۳-۳. نقشه ماهواره‌ای سنتینل ۱ ( $InSAR$ )

در این پژوهش از پردازش تصاویر راداری ( $InSAR$ ) ماهواره سنتینل ۱ برای زمان ۲۰۱۵ (earth.esa.int) و میزان فرونشست آبخوان دشت جنوب‌غربی تهران بدست آمد تا بتوان به وسیله این داده‌ها، چارچوب کلی ارائه شده برای آبخوان دشت جنوب‌غربی تهران را ارزیابی کرد. سنتینل ۱ در ۳ آوریل ۲۰۱۴ ماموریت خود را آغاز کرد. ماهواره مدار قطبی است که به صورت راداری تصویربرداری را انجام می‌دهد و قادر است که پدیده‌ها و عوارض را در شب و روز بدون در نظر داشتن شرایط آب و هوایی جمع‌آوری و اخذ کند. همچنین می‌تواند در بدترین شرایط آب و هوایی نیز به جمع‌آوری اطلاعات از سطح زمین بپردازد.

### ۴. روش کار و تهیه لایه‌های رستری

به منظور اجرای روش  $ALPRIFT$  در محیط ArcGIS مراحل آماده‌سازی نقشه‌های معیار مدل، وزن دهی و تلفیق لایه‌های مختلف اطلاعاتی اعمال شدند. برای تهیه لایه‌ی محیط آبخوان، از لاگ‌های زمین شناسی مربوط به بیژومترهای موجود در دشت که توسط سازمان آب منطقه‌ای تهران مطالعه شده بود، استفاده گردید و پس از نرخ‌دهی طبق جدول ۱ در محیط نرم افزار ArcGIS درون یابی و کلاس بندی شده و لایه رستری آن تهیه گردید (شکل ۴-الف). نوع کاربری زمین یکی از عوامل موثر بر فرونشست می‌باشد. برای بدست آوردن لایه کاربری زمین از نقشه کاربری زمین که توسط سازمان نقشه برداری تهیه شده است استفاده شده و طبق جدول ۱

### ۳. ماشین بردار پشتیبان ( $SVM$ )

ماشین بردار پشتیبان یک تخمین‌گر رایج و قابل اعتماد براساس یادگیری تحت نظارت است که تئوری و ایده اصلی آن توسط واپنیک (۱۹۹۵) ارائه گردید که تابع آن به صورت رابطه ۲ بیان می‌شود (Salat, Osowski., 2004):

$$f(x) = \sum_{i=1}^N (a_i - a_i^*) k(x, y) + b_i \quad (2)$$

که در آن  $(a_i - a_i^*)$  ضرایب لاگرانژ،  $k(x, y)$  تابع کرنل و  $b_i$  بایاس می‌باشند.

سه فاکتور عملکرد یک رگرسیون ماشین بردار پشتیبان را تحت تاثیر قرار می‌دهند که عبارتند از: ثابت خطای غیرحساس ( $\epsilon$ )، فاکتور تنظیم ( $c$ ) و پارامتر کرنل ( $\gamma$ ) (Ebtehaj et al., 2016).  $\epsilon$  ثابت پهنای بانندی را تعریف می‌کند که از خطای صرف‌نظر می‌شود و هرچقدر این ثابت کوچکتر شود، تعداد بردار پشتیبان تعیین شده توسط  $SVM$  افزایش می‌یابد. پارامتر  $C$  پیچیدگی سیستم را تنظیم می‌کند که توسط بردار وزن داده شده و خطاهای تخمینی اندازه‌گیری شده توسط  $\epsilon$  مشخص می‌شود. انتخاب توابع کرنل و همچنین پارامترهای مدل، نقش مهمی را در عملکرد مدل بردار پشتیبان ایفا می‌کنند. انواع مدل‌های ماشین بردار پشتیبان عبارتند از طبقه‌بندی بردار پشتیبان (Support vector classification)، رگرسیون بردار پشتیبان (Support vector regression)، حداقل مربعات ماشین بردار پشتیبان (Least-squares support vector machine)، برنامه ریزی خطی ماشین بردار پشتیبان (Linear programming support vector machine) و ماشین بردار پشتیبان Nu (Nu-support vector machine). در این تحقیق از تابع پایه شعاعی (Radial basis function) به عنوان تابع کرنل ماشین بردار پشتیبان استفاده گردیده است که رابطه آن به صورت رابطه ۳ است:

$$K(x, y) = \exp(-\gamma \|x - z\|), \gamma > 0, \gamma = 1/(2\sigma^2) \quad (3)$$

شد و لایه رستری حاصل از آن ایجاد گردید (شکل ۴-ب) برای تهیه لایه تغذیه که تاثیر بسزایی در فرونشست دارد، از روش پیسکوپو (Piscopo, 2001) استفاده شد که از تلفیق ۳ لایه شیب، بارندگی و نفوذپذیری خاک میزان تغذیه حاصل شد و براساس جدول ۱ رتبه دهی و کلاس بندی شد و سپس لایه رستری حاصل از تهیه شد (شکل ۴-ت).

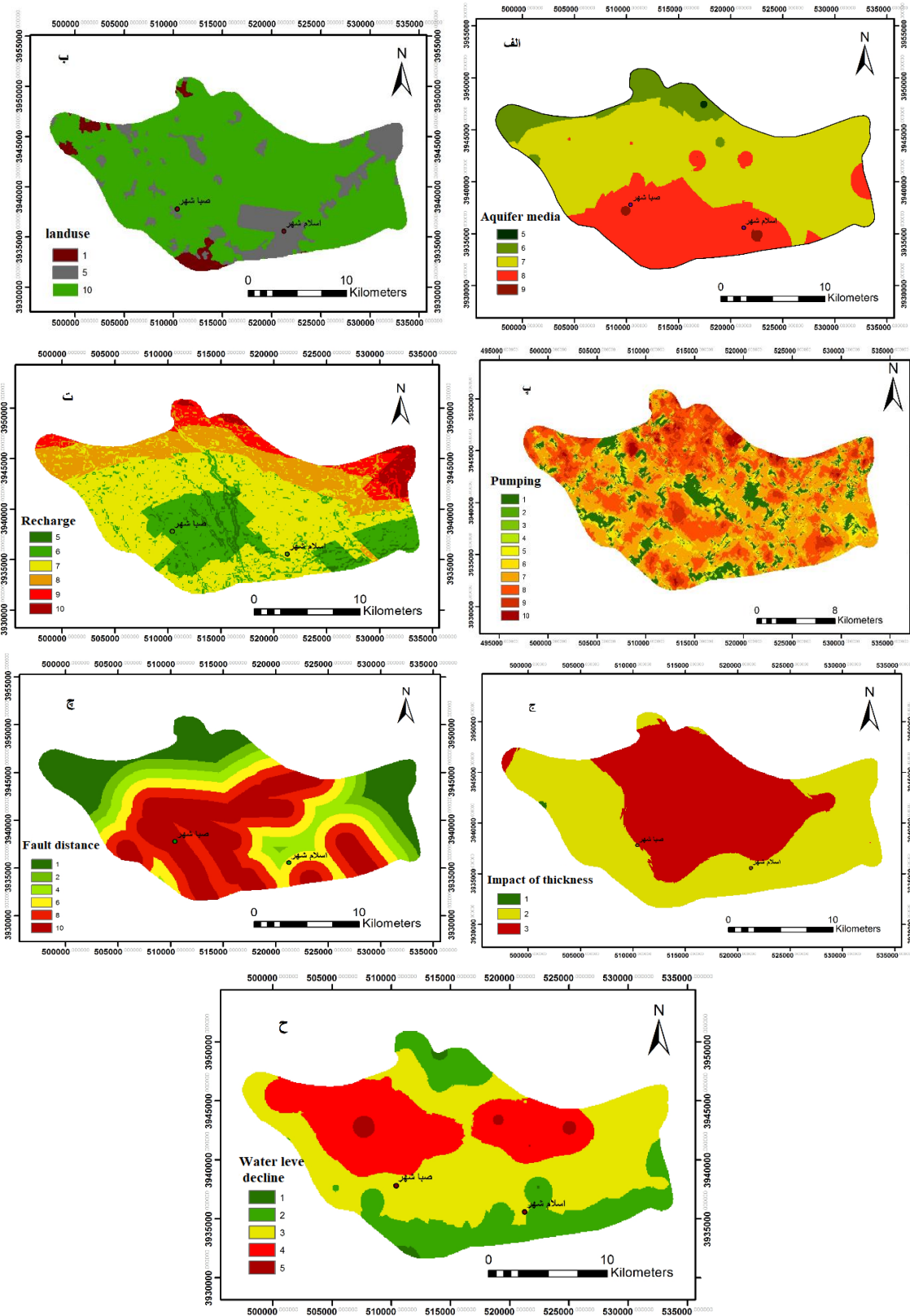
نرخ دهی و لایه رستری آن تهیه شد (شکل ۴-ب). پمپاژ آب زیرزمینی که باعث پایین افتادن سطح آب زیرزمینی شده و به دنبال آن باعث افزایش فرونشست زمین خواهد شد. برای تهیه این لایه از اطلاعات برداشت سالانه چاه های پمپاژ موجود در دشت مورد مطالعه استفاده و با روش پلیگون تیسن مقدار تخلیه برای هر پیزومتر مشخص و برای کل منطقه درون یابی

جدول ۱. محدوده و کلاس لایه های ALPRIFT (Nadiri et al., 2018)

Aquifer media (A)	Land use (L)		Pumping of groundwater (P)		Recharge (R)		Impacts of aquifer thickness (I)		Fault distance (F)		Decline of water table (T)		Subsidence vulnerability indices (SVI)		
Range	Rate	Range	Rate	Range	Rate	Range (r)	Rate	Range	Rate	Range	Rate	Range	Rate	Band	SVIs level
				(cm/year)		(cm/year)		(m)		(km)		(m/year)		(b)	
Clay	8-10	Mining/resources extraction	9-10	$b \leq r \leq 0.0001$	1	$0 \leq r \leq b \ 4$	10	$0 \leq r \leq b \ 25$	1	$0 \leq r \leq b \ 1$	10	$0 \leq r \leq b \ 0.2$	1	$24 \leq b \leq 78$	Band 1 (Low)
Silt	8-9	Irrigated farming	7-9	$0.0001 \leq r \leq b \ 0.005$	2	$4 \leq r \leq b \ 9$	9	$25 \leq r \leq b \ 55$	2	$1 \leq r \leq b \ 2$	8	$0.2 \leq r \leq b \ 0.5$	2	$78 \leq b \leq 132$	Band 2 (Moderate)
Karstic Sediments	6-8	Dam construction	6-9	$0.005 \leq r \leq b \ 0.01$	3	$9 \leq r \leq b \ 14$	7	$55 \leq r \leq b \ 90$	3	$2 \leq r \leq b \ 3$	6	$0.5 \leq r \leq b \ 0.9$	3	$132 \leq b \leq 186$	Band 3 (High)
Sand	3-5	Built-up (residential etc.)	4-8	$0.01 \leq r \leq b \ 0.5$	4	$14 \leq r \leq b \ 19$	5	$90 \leq r \leq b \ 130$	4	$3 \leq r \leq b \ 4$	4	$0.9 \leq r \leq b \ 1.4$	4	$186 \leq b \leq 240$	Band 4 (Very high)
Gravel	2-3	Transportation	3-4	$0.5 \leq r \leq b \ 1$	5	$19 \leq r \leq b \ 24$	3	$130 \leq r \leq b \ 175$	5	$4 \leq r \leq b \ 2$	2	$1.4 \leq r \leq b \ 2$	5		
Rock types e.g. (Sedimentary, etc.)	1-3	Dry farming/grassland	1-2	$1 \leq r \leq b \ 5$	6	N24	1	$175 \leq r \leq b \ 225$	6	N5	1	$2 \leq r \leq b \ 2.7$	6		
Oxidised Organic soil	8-10	Barren land	1	$5 \leq r \leq b \ 20$	7			$225 \leq r \leq b \ 280$	7			$2.7 \leq r \leq b \ 3.5$	7		
				$20 \leq r \leq b \ 40$	8			$280 \leq r \leq b \ 340$	8			$3.5 \leq r \leq b \ 4.4$	8		
				$40 \leq r \leq b \ 65$	9			$340 \leq r \leq b \ 405$	9			$4.4 \leq r \leq b \ 5.4$	9		
				N65	10			N405	10			N5.4	10		

Note 1: if each data layer scores a rate of 1, the minimum ALPRIFT SVI value is 24 ( $=1 \times 5 + 4 \times 1 + 4 \times 1 + 3 \times 1 + 2 \times 1 + 1 \times 1 + 5 \times 1$ ).

Note 2: if each data layer scores a rate of 10, the maximum ALPRIFT SVI value is 240 ( $=5 \times 10 + 4 \times 10 + 4 \times 10 + 3 \times 10 + 2 \times 10 + 1 \times 10 + 5 \times 10$ ).

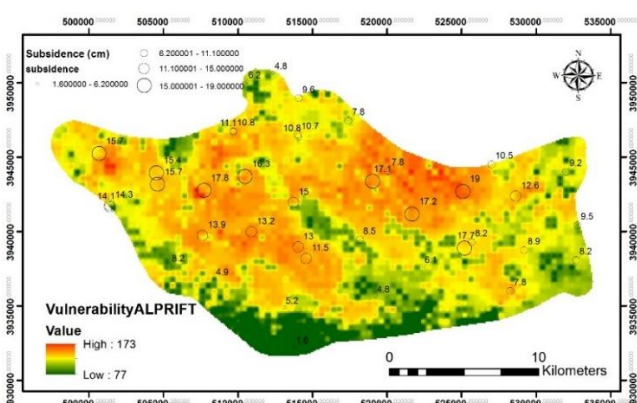
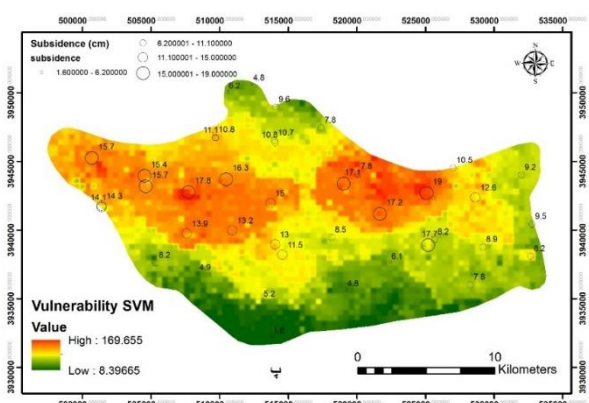
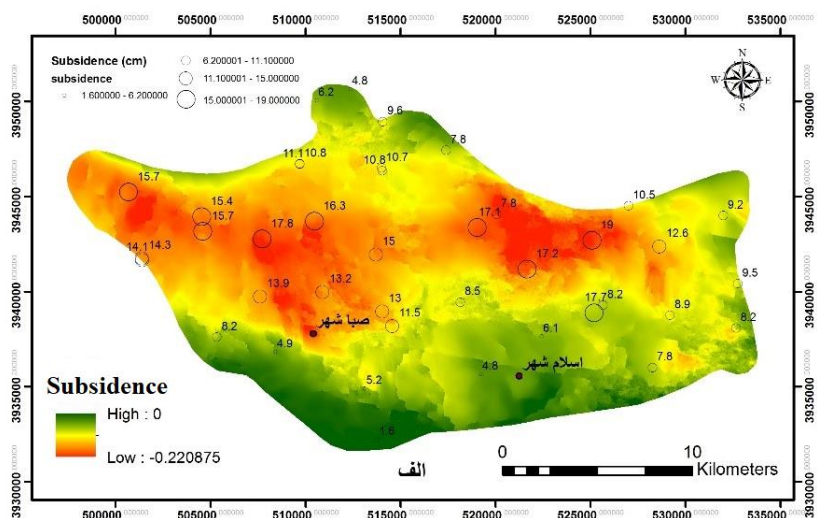


شکل ۴. لایه‌های رستری پردازش شده ALPRIFT. الف) جنس لایه‌های زیرین ب) کاربری زمین ب) پمپاژ ت) تغذیه ج) ضخامت آبخوان چ) فاصله از گسل ح) افت سطح آب زیرزمینی



مورد فعالیت گسل‌ها، گسل‌های فعال و تاثیرگذار در فرونشست مشخص شده و با استفاده از دستور Euclidean distance و طبق جدول ۱ رتبه‌دهی و لایه رستری حاصل از آن به منظور تلفیق آن تهیه گردید (شکل ۴-ج). برای تهیه لایه افت سطح آب زیرزمینی، از اطلاعات یک ساله مربوط به پیزومترهای سازمان آب موجود در منطقه استفاده شد. اختلاف سطح آب در مهرماه ۹۵-۹۴ بدست آمد و پس از رتبه دهی طبق جدول ۱ و درون یابی، لایه رستری حاصل از آن تهیه شد (شکل ۴-ح)

برای تهیه لایه ضخامت آبخوان، از اطلاعات چاه‌های پیزومتری آب منطقه ای و نقشه ژئوالکتریک سنگ کف سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی (۱۳۸۶) استفاده شد. بدین منظور با استفاده از سطح آب زیرزمینی و قرارگیری سطح سنگ کف، میزان ضخامت دشت مورد مطالعه بدست آمده و طبق جدول ۱ نرخ دهی و درون‌یابی و کلاس بندی شده و لایه رستری حاصل از آن تهیه گردید (شکل ۴-ج). به منظور بدست آوردن لایه فاصله از گسل، از نقشه سازمان زمین شناسی برای بدست آوردن موقعیت گسل‌های موجود در دشت استفاده و سپس با استفاده از اطلاعات موجود در



شکل ۵. الف) نقشه فرونشست ماهواره‌ای InSAR (ب) نقشه آسیب‌پذیری فرونشست مدل ALPRIFT (پ) نقشه بهینه شده حاصل از

مدل SVM

## ۵. بحث و نتایج

## ۵-۱. نتایج اجرای روش ALPRIFT

پس از تهیه هفت لایه مورد نیاز برای استفاده از روش ALPRIFT، باید این لایه‌ها را به منظور تهیه نقشه آسیب-پذیری فرونشست، بر روی هم تلفیق کرد. وزن‌دهی لایه‌های بدست آمده بر اساس مدل ALPRIFT بوده و در جدول ۱ ارائه شده است. بر اساس نتایج بدست آمده شاخص آسیب-پذیری فرونشست مدل ALPRIFT برای دشت مورد مطالعه ۱۷۳-۷۷ برآورد شد (شکل ۵.ب).

## ۵-۲. نتایج مدل‌سازی با استفاده از ماشین بردار پشتیبان (SVM)

در روش ماشین بردار پشتیبان هفت پارامتر روش ALPRIFT به عنوان ورودی‌های مدل و شاخص ALPRIFT تصحیح شده (SPI) که در رابطه ۴ نشان داده شده است به عنوان خروجی مدل به کار گرفته شد.

$$SPI = Vul_{max} \times \frac{sbsidence}{Subsidence_{max}} \quad (4)$$

در رابطه ۴،  $Vul_{max}$  حداکثر شاخص ALPRIFT،  $Subsidence_{max}$  حداکثر میزان فرونشست در دشت مورد مطالعه و  $sbsidence$  میزان فرونشست در هر نقطه را نشان می‌دهد. مقادیر شاخص آسیب‌پذیری که همان نتایج بدست آمده از روش ALPRIFT بود، با مقادیر فرونشست مربوط به آن تصحیح و آموزش مدل با این مقادیر تصحیح شده انجام شد. به طوری که ورودی مدل در مرحله آموزش، پارامترهای ALPRIFT و خروجی آن مقادیر تصحیح شده شاخص آسیب‌پذیری بود. برای اجرای مرحله آزمایش مدل نیز همانند مدل آموزش انجام پذیرفت. در این پژوهش تقریباً ۲۰ درصد داده‌ها برای مرحله آزمایش به مدل تعریف شد و ۸۰ درصد آن برای مرحله آموزش مورد استفاده قرار گرفت. در این پژوهش از تابع پایه شعاعی، به عنوان تابع کرنل ماشین بردار پشتیبان استفاده شد. بر اساس نتایج بدست آمده شاخص

آسیب‌پذیری فرونشست مدل ماشین بردار پشتیبان برای دشت مورد مطالعه ۱۷۰-۸ برآورد شد (شکل ۵.پ) همانطوری در شکل ۵ مشاهده می‌شود در تصویر ۵.الف میزان فرونشست راداری حاصل از تصاویر ماهواره ای سنتینل می‌باشد که قسمت‌های قرمز رنگ نشان از فرونشست زیاد در منطقه که حدود ۲۲ سانتی متر در سال را نشان می‌دهد و قسمت‌های سبز رنگ نشان از فرونشست کم و نبود فرونشست در منطقه می‌باشد. تصویر ۵.ب حاصل مدل ALPRIFT می‌باشد که در این تصویر هم قسمت‌های قرمز رنگ مناطق دارای پتانسیل برای فرونشست و قسمت‌های سبز رنگ مناطق کم خطر برای فرونشست می‌باشند ولی همانگونه که در تصویر ۵.پ مشاهده می‌شود مدل ماشین بردار پشتیبان دارای همبستگی بیشتری با فرونشست حاصل از تصاویر راداری می‌باشد و نسبت به مدل ALPRIFT مدل واقعی تری برای ارزیابی آسیب‌پذیری مناطق با پتانسیل فرونشست می‌باشد.

## ۶. معیارهای ارزیابی دقت مدل‌های به کار گرفته در این

## پژوهش

در این پژوهش به منظور ارزیابی کارایی مدل‌ها و توانایی آن برای پیش‌بینی دقیق از سه معیار جذر میانگین مربع خطا (RMSE) (رابطه ۵)، ضریب تعیین ( $R^2$ ) (رابطه ۶) و شاخص همبستگی (CI) استفاده شده است. دو معیار اول، به صورت روابط ۵ و ۶ محاسبه می‌شوند ولی شاخص همبستگی به منظور بررسی دقیق‌تر شاخص آسیب‌پذیری فرونشست، استفاده می‌شود. به این منظور مقدار میزان فرونشست به ۴ دسته، بسیار کم، کم، متوسط و زیاد تقسیم شد. سپس تعداد چاه‌هایی که مقادیر فرونشست آن با نقشه‌های آسیب‌پذیری ارزش یکسانی دارند و در یک گروه قرار دارند به ۴ ضرب می‌شوند و آن تعداد چاه‌هایی که میزان فرونشست و گروه آسیب‌پذیری آن به مقدار ۳، ۲ و ۱ اختلاف دارند به ترتیب در ۳، ۲ و ۱ ضرب می‌شوند.

همانطور که مشخص شد CI حاصل از مدل SVM بیشتر از مدل ALPRIFT می باشد و این نشان دهنده بالابودن شاخص همبستگی مدل SVM نسبت به مدل ALPRIFT می باشد. شکل ۶ نمودار ضریب تعیین بین فرونشست و مدل های ALPRIFT، SVM را نشان می دهد. ضریب تعیین فرونشست حاصل از تصاویر راداری با آسیب پذیری پتانسیل فرونشست حاصل از مدل ALPRIFT برابر با ۰/۴۱۳ و با مدل SVM که حاصل بهینه سازی مدل ALPRIFT می باشد برابر با ۰/۸۶۲ می باشد که می توان نتیجه گرفت مدل SVM، مناطق دارای پتانسیل فرونشست را بهتر از مدل ALPRIFT نشان می دهد.

سپس مقادیر حاصل با هم جمع بسته می شوند و شاخص همبستگی (CI) به دست می آید. که این می تواند همبستگی بین روش های ارزیابی آسیب پذیری و میزان فرونشست را نشان دهد. CI بیشتر به معنای همبستگی بیشتر است (Fijani et al., 2013). جدول ۲، معیارهای ارزیابی دقت بین مدل ALPRIFT و مدل بهینه شده SVM را باهم مقایسه میکند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}{n}} \quad (5)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6)$$

جدول ۲. مقایسه مدل ALPRIFT با مدل SVM و GEP

model	subsidence				R <sup>2</sup>	RMSE	CI
	classification	Very low	low	moderate			
ALPRIFT	Very low	0	1	5	0.41	0.60	110
	low	0	1	12			
	moderate	0	7	2			
	high	0	7	3			
SVM	Very low	6	0	0	train	0.86	115
	low	8	5	0			
	moderate	0	9	0	test	0.80	
	high	0	10	0			

$$ALPRIFT : CI = 4(1 + 2) + 3(1 + 13 + 7 + 3) + 2(5 + 7) + 1(0) = 110$$

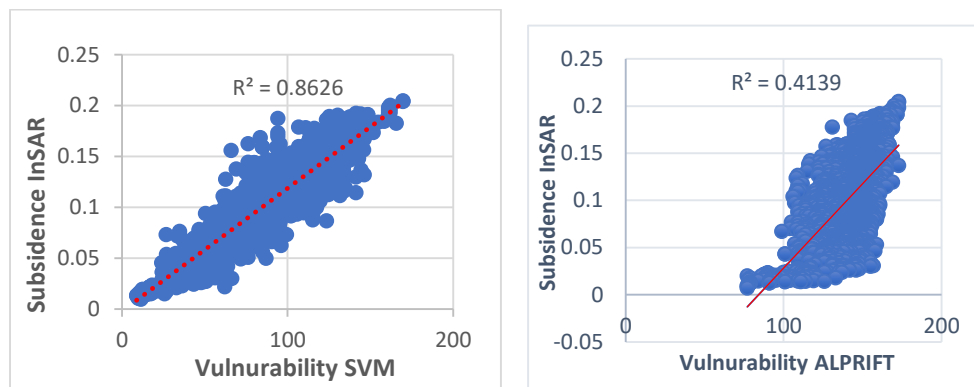
$$SVM: CI = 4(6 + 5) + 3(9 + 8) + 2(10) + 1(0) = 115$$

بردار پشتیبان است. دشت تهران که یکی از دشت های مهم است نیاز به بررسی و ارزیابی پتانسیل فرونشست در این دشت، به منظور مدیریت اثرات آن امری ضروری است

#### ۷. نتیجه گیری

هدف از انجام این پژوهش، تعیین آسیب پذیری فرونشست آبخوان جنوب غربی تهران با استفاده از روش ALPRIFT و پس از آن بهینه کردن نتایج این روش با استفاده از مدل ماشین

براساس نتایج بدست آمده شاخص آسیب پذیری ALPRIFT برای منطقه مورد مطالعه ۱۷۳-۷۷ برآورد شد.



شکل ۶. نمودارهای ضریب همبستگی بین مدل‌ها و میزان فرونشست

شده در پی داشته است. با توجه به اهمیت فرونشست در منطقه مورد مطالعه، جلوگیری از فرونشست مناطق دارای پتانسیل فرونشست بیشتر به منظور مدیریت بهینه منابع آبی و جلوگیری از فرونشست بیشتر ضروری به نظر می‌رسد. پیشنهاد می‌شود با توجه به مشخص شدن مناطق با آسیب پذیری زیاد در دشت جنوب غربی تهران، از برداشت بیش از حد آب‌های زیرزمینی خودداری شود.

شاخص آسیب پذیری دشت در محدوده خیلی کم تا متوسط قرار می‌گیرد. چون این دشت دارای پیچیدگی‌هایی از نظر نوع و جنس آبخوان دارد، از مدل ماشین بردار پشتیبان که توانایی زیادی در تجزیه تحلیل سیستم‌های پیچیده دارند برای بهینه سازی استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد در این تحقیق مدل SVM با داشتن CI و  $R^2$  بیشتر نسبت به روش ALPRIFT برآورد نسبتاً دقیقی از میزان آسیب پذیری در منطقه مطالعه

## منابع

- حق شناس، محمد، شعاعی، غلامرضا، ریاحی، محمد علی. ۱۳۹۵، شبیه سازی فرونشست زمین به علت افت آب زیرزمینی به روش المان محدود در منطقه شهریار (گمانه بردآباد)، چهارمین کنگره بین المللی عمران، معماری و توسعه شهری
- سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور. ۱۳۸۴، " بررسی فرونشست زمین در دشت تهران-شهریار (گزارش نخست)" ۵۴ صفحه
- شریفی کیا، محمد، ۱۳۹۱، تعیین میزان و دامنه فرونشست زمین به کمک روش تداخل سنجی راداری (D-InSAR) در دشت نوق-بهرمان، برنامه ریزی و آمایش فضا، دوره ۱۶، شماره ۳، ص. ۵۵ تا ۷۷
- محمودپور، مسعود. ۱۳۹۴، "نقش اندرکنش ویژگی‌های زمین شناسی مهندسی و برداشت آب‌های زیرزمینی در سازوکار و الگوی فرونشست زمین در گستره جنوب باختری تهران". رساله دوره دکتری زمین شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس
- Amighpey, M., Arabi, S., Talebi, A., Djamour, Y., 2006. Elevation Changes of the Precise Leveling Tracks in the Iran Leveling Network. Scientific Report Published in National Cartographic Center (NCC) of Iran.
- Daley, D., Drew, D., 1999. Irish methodologies for karst aquifer protection. In: Beek B, editor. Hydrogeology and engineering geology of sinkholes and karst. Rotterdam: Balkema. p. 267-72.

- Dixon, B., 2005a. Applicability of neuro-fuzzy techniques in predicting groundwater vulnerability: a GIS-based sensitivity analysis. *Journal of Hydrology*, 309(1-4): 17-38.
- Dixon, B., 2005b. Groundwater vulnerability mapping: a GIS and fuzzy rule based integrated tool. *Journal of Applied Geography*, 25: 327-347.
- Dixon, B., 2009. A case study using support vector machines, neural networks and logistic regression in a GIS to identify wells contaminated with NO<sub>3</sub>-N. *Hydrogeology Journal*, 17: 1507-1520.
- Ebtehaj, I., Bonakdari, H., Shamsirband S, Mohammadi, K., 2016. A combined support vector machine-wavelet transform model for prediction of sediment transport in sewer. *Flow Measurement and Instrumentation*, 47: 19-27.
- Ferreira, C., 2001. Gene expression programming in problem solving, In: 6th Online World Conference on Soft computing in Industrial Applications (Invited Tutorial).
- Fijani E, Nadiri A.A, Asghari Moghaddam A, Tsai F, Dixon B., 2013. Optimization of DRASTIC Method by Supervised Committee Machine Artificial Intelligence to Assess Groundwater Vulnerability for Maragheh-Bonab Plain Aquifer, Iran. *Journal of hydrology*, 530: 89-100.  
<https://earth.esa.int/web/guest/home;jsessionid=B8E0E07CDE09AEA585E2E535244DB110.jvm2>
- Kumar, A.R.S., Sudheer, K.P., Jain, S.K., Agarwal, P.K., 2005. Rainfall-runoff modelling using artificial neural networks: comparison of network types. *Hydrological Processes*, 19 (6): 1277-1291.
- Nadiri, A., Taheri, Z., Khatibi, R., Barzegari, G., Dideban, Kh. 2018. Introducing a new framework for mapping subsidence vulnerability indices (SVIs): ALPRIFT. *Science of the Total Environment*, 628-629: 1043-1057
- Mahmoudpour, M., Khamchian, M., Nikudel, M.R., Ghasemi, M.R, 2016. Numerical simulation and prediction of regional land subsidence caused by groundwater exploitation in the southwest plain of Tehran, Iran. *Engineering Geology*, 201: 6-28
- Poland, J.F.(Ed.), 1984. Guidebook to Studies of Land Subsidence due to Ground Water Withdrawal. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. Paris. Studies and reports in hydrology 40. 305 p.
- Salat, R., Osowski, S., 2004. Accurate fault location in the power transmission line using support vector machine approach. *Power Systems IEEE Transactions*, 19: 879-886.
- SCI, Statistical Central of Iran, 2016. National Population and Housing Census. [www.amar.org.ir](http://www.amar.org.ir).
- Valverde Ramdrez, M.C., de Campos Velho, H.F., Ferreira, N.J., 2005. Artificial neural network technique for rainfall forecasting applied to the Sao Paulo region. *Journal of Hydrology*. 301(1): 146-162.
- Vapnik, V.N., 1995. *The Nature of Statistical Learning Theory*. Springer, New York, 314 p.
- Van Stemproot, D., Evert, L., Wassenaar, L., 1993. Aquifer vulnerability index: a GIS compatible method for groundwater vulnerability mapping. *Canadian Water Resources Journal*, 18:25-37.
- Vrba, J., Zaporozec, A., 1994. Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability. International Association of Hydrogeologists (International Contributions to Hydrogeology 16), Verlag Heinz Heise, Hannover.
- Waltham, A.C., 1989. *Ground Subsidence*. Chapman & Hall, 202 p.
- Younger, P.L., 2007. *Groundwater in the Environment*, Blackwell, 185p.